



© Heimerl

## Untersuchung von dynamischer Stauzielregelung hinsichtlich der Stauwurzelerentwicklung

In Zeiten der Energiewende und dem intensivierten Ausbau von erneuerbaren Energiesystemen stellt dieser Artikel einen Optimierungsansatz für die Laufwasserkraft vor - die dynamische Stauzielregelung. Deren Grundidee ist es, staubeeinflusste Fließgewässerabschnitte über das Betriebsregime einer Wasserkraftanlage gleichmäßiger zu nutzen. Anders als bei der herkömmlichen Stauzielregelung wird die Stauwurzel bei steigenden Abflüssen nicht an das Querbauwerk herangedrückt, sondern wird durch das temporäre Anheben des Stauziels in seiner Lage gehalten. Daraus wird für die höheren Durchflüsse eines Betriebsregimes eine größere Fallhöhe generiert. Dies wirkt sich, wie an einem Beispiel gezeigt werden kann, direkt auf die Leistung und in Zusammenspiel mit der Abflussdauerlinie auf die Jahresarbeit der Anlage aus. Somit stellt die dynamische Stauzielregelung eine umweltverträgliche, energiewirtschaftliche Optimierung für Laufwasserkraftanlagen dar.

Niklas Schwiersch

### 1 Einleitung und Motivation

Der Begriff der Effizienz von Wasserkraftanlagen besitzt für deren Betreiber in Zeiten der Energiewende eine hohe Relevanz. Da der Ausbaugrad der Wasserkraft an großen Fließgewässern in Deutschland bereits auf einem hohen Niveau liegt, die Wasserkraft an kleinen Fließgewässern seit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in den Fokus rückt und der Neubau von Querbauwerken für die Wasserkraftnutzung genehmigungstechnisch nahezu unmöglich erscheint, ist die bestmögliche Nutzung von Anlagen in den stand-

#### Kompakt

- Dynamische Stauzielregelung erweitert die jährliche Fallhöhenverfügbarkeit.
- Unter Beibehaltung der Staulänge wird die elektrische Jahresarbeit gesteigert.
- Die dynamische Stauzielregelung stellt einen umweltverträglichen Optimierungsansatz zum Ausbau erneuerbarer Energien dar.

ortspezifischen Rahmenbedingungen anzustreben. Dafür werden bestehende Anlagen effizienzsteigernd umgebaut, Wehrstandorte ohne bisherige wasserkraftliche Nutzung als Anlagenstandorte neu erschlossen und Standorte mit ruhenden Wassernutzungsrechten wieder in Betrieb genommen. Im Rahmen einer steuerungstechnischen Optimierung kann eine dynamische Stauzielregelung gleichermaßen für geplante oder bestehende Anlagen eine effizienzsteigernde Maßnahme darstellen.

## 2 Dynamische Stauzielregelung

Grundidee der dynamischen Stauzielregelung ist es, mit Hilfe eines abflussabhängigen Stauziels eine größere Fallhöhe der Energieerzeugung zuzuführen. Dadurch können die Ausbauleistung sowie die Jahresarbeit  $E_a$  einer Anlage erhöht werden. Zwingende bauliche Voraussetzung für die dynamische Stauzielregelung ist die Ausrüstung der Wehranlage mit beweglichen Stauelementen [1].

Für die dynamische Stauzielregelung ist die durch den Aufstau des Fließgewässers beeinflusste Fließstrecke planerische Randbedingung. Diese ist mit den Regelorganen für das Betriebsregime der Wasserkraftanlage konstant zu halten. Im Gegensatz zur bisherigen, statischen Stauzielregelung wird die Stauwurzel bei größeren Abflussereignissen nicht mehr an das Querbauwerk herangedrückt, sondern im Oberwasser am Beginn der staubeeinflussten Fließstrecke gehalten (**Bild 1**). Dies führt dazu, dass das zugehörige Stauziel höher liegt als im statischen Stau und eine größere Fallhöhe mit dem Turbinendurchfluss kombiniert wird.

Zur Berechnung der elektrischen Leistung sind die Fallhöhe und der Durchfluss linear mit einander zu kombinieren. Darüber hinaus werden die Dichte des Wassers, die Gravitation und der Gesamtwirkungsgrad der Anlage zur Ermittlung der Netto-Leistung berücksichtigt [3]:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot Q_T(t) \cdot h_f \cdot \eta_{ges} \tag{1}$$

- $P$  Elektrische Leistung [kW]
- $\rho_w$  Dichte von Wasser [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- $Q_T(t)$  zeitabhängiger Turbinendurchfluss [m<sup>3</sup>/s]
- $h_f$  Fallhöhe [m]
- $\eta_{ges}$  Gesamtwirkungsgrad der WKA [-]

Aus hydraulischer Sicht lässt sich demzufolge eine Leistungssteigerung an Wasserkraftanlagen neben wirkungsgradsteigernden Maßnahmen lediglich über einen zusätzlichen Turbinendurchfluss oder über zusätzliche Fallhöhe generieren. Letztere ist Ansatz der dynamischen Stauzielregelung. An einem Staubaauwerk beschreibt die Fallhöhe den verlustbehafteten Höhenniveauunterschied zwischen den Wasserspiegellagen im Ober- und im Unterwasser. Mit einem als weitgehend konstant anzunehmenden, genehmigten Stauziel im Oberwasser und einem durchflussabhängigen Wasserstand im Unterwasser ergibt sich in der Praxis die nutzbare Fallhöhe  $h_f$  in Abhängigkeit der Normalabflusstiefe im Unterwasser sowie der Summe der Verlusthöhen [3]:

$$h_f(t) = Z_{Stau} - Z_{UW}(Q(t)) - \sum_i h_{v,i} \tag{2}$$

- $t$  Variable der Zeit [s]
- $Z_{Stau}$  Stauziel [m ü. NHN]
- $Z_{UW}$  Wasserspiegellage im Unterwasser [m ü. NHN]
- $\sum_i h_{v,i}$  Summe der Verlusthöhen [m]

Zu berücksichtigende Verlusthöhen sind von der Fließgeschwindigkeit abhängig, wie beispielsweise Rechen-, Ein- und Auslaufverluste. Für die Umsetzung der dynamischen Stauzielregelung sind diese weitgehend konstant. Abflussbedingt variabel ist hingegen die Wasserspiegellage im Unterwasser, wodurch bei einem statischen Stau eine frühe Fallhöhenabnahme eintritt. Um dem entgegenzuwirken, erhält das Stauziel bei einer dynamischen Stauzielregelung ebenfalls eine Abhängigkeit vom Abfluss [2]:

$$h_f(t) = Z_{Stau}(Q(t)) - Z_{UW}(Q(t)) - \sum_i h_{v,i} \tag{3}$$

Dadurch kann die Fallhöhe über das Stauziel gesteuert und als Kontrollgröße in die Anlagensteuerung integriert werden.

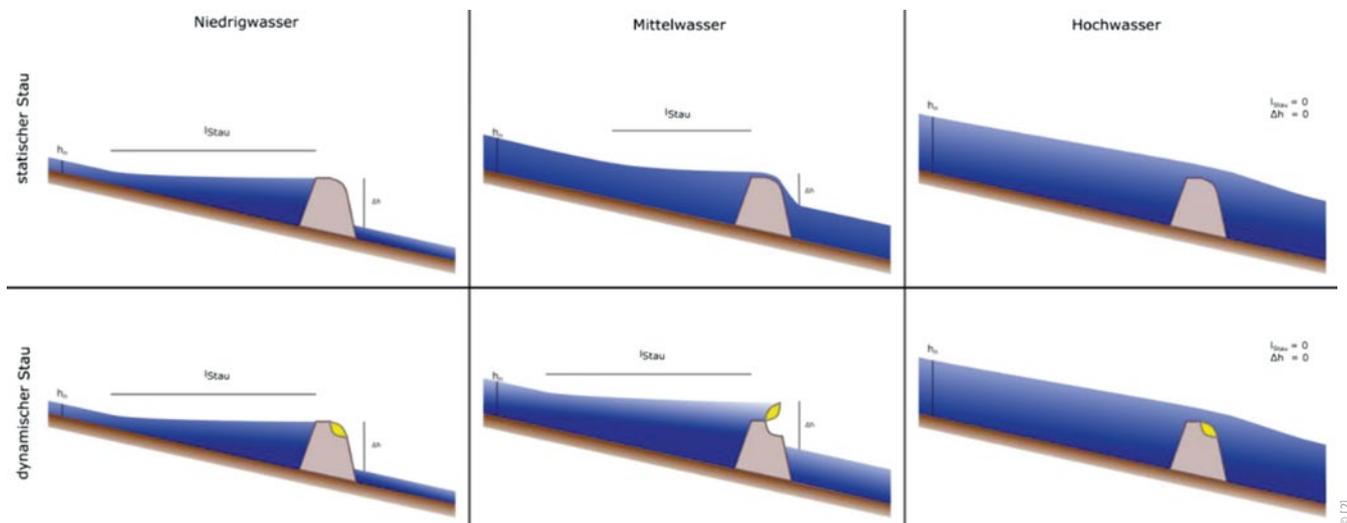
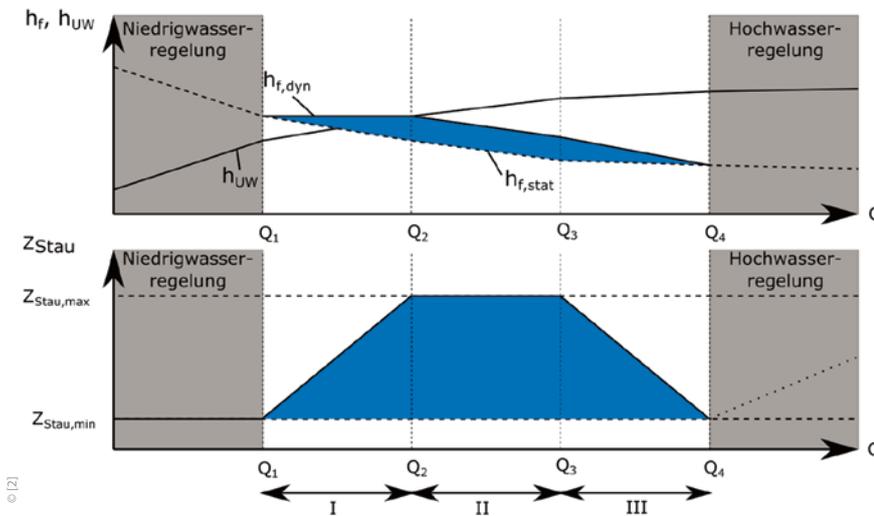


Bild 1: Prinzipskizze von statischer (oben) und dynamischer Stauzielregelung (unten)



**Bild 2:** Schematisierte Steuerung und Fallhöhenverlauf bei einer dynamischen Stauzielregelung

Änderungen an der Fallhöhenverfügbarkeit setzen sich linear in die Jahresarbeit der Anlage als Produkt aus Leistung und Zeit fort.

Die Umsetzung einer dynamischen Stauzielregelung erfolgt in den Betriebsgrenzen der installierten Maschinensätze. Demnach wird dem höchsten Betriebsdurchfluss das maximale Stauziel  $Z_{\text{Stau,max}}$  zugeordnet. Entsprechend erfolgt die Zuordnung des minimalen Stauziels  $Z_{\text{Stau,min}}$  dem niedrigsten Betriebsdurchfluss. Innerhalb dieses Betriebsregimes wird die dynamische Stauzielregelung so implementiert, dass die Länge der Stauhaltung konstant bleibt. Bei größeren Durchflüssen greifen Regelungen der Hochwassersteuerung, wie zum Beispiel die Vorentlastung zur Schaffung von zusätzlichem Retentionsraum oder der Retentionsstau zur Kappung des Hochwasserscheitels [4].

In der praktischen Umsetzung bedeuten diese Überlegungen, dass sich die Steuerung in drei Steuerungsphasen gliedert (**Bild 2**). Unterhalb der unteren Betriebsgrenze  $Q_1$  greifen Regelungen für den Niedrigwasserfall und die Anlage steht aufgrund einer zu geringen Beaufschlagung der Turbinensätze. Bei einer Überschreitung von  $Q_1$  wird die Anlage in Betrieb genommen. Dabei wird das Stauziel über die gesamte Betriebsphase I insofern erhöht, dass die Fallhöhe und die Lage der Stauwurzel konstant gehalten werden. Sobald das Regelorgan bei einer Durchflussmarke von  $Q_2$  vollständig aufgestellt ist, kann das Stauziel aus konstruktiven Gründen nicht weiter angehoben werden und verbleibt über die Phase II auf dem Niveau des maximalen Stauziels, so dass die Fallhöhe infolge eines weiter steigenden Unterwasserstands abnimmt. Ab der oberen Betriebsgrenze  $Q_3$  ist es schließlich erforderlich, das Stauziel zur Gewährleistung einer effektiven Hochwasserregelung über die Phase III hinweg auf das Ausgangsniveau  $Z_{\text{Stau,min}}$  zu senken. Während dieser Phase wird eine wasserkräftliche Nutzung nicht zwangsweise weiter betrieben, weil die vorhandene Fallhöhe unter die Grenze des wirtschaftlichen Betriebs der Anlage fallen kann.

Wird das Stauziel dynamisch erhöht, vergrößert sich die Höhe des Aufstaus im Fließgewässer, wobei der Verlauf der Staulinie sowie der Horizont des einsickernden Grundwassers vertikal gehoben werden. Daraus ergeben sich für die Bemessung einer Wehranlage relevante Wasserdrücke aus den verschiedenen Betriebszuständen der Anlage. Dabei sind der geringste

Wasserstand zusammen mit dem Niedrigwasserdurchfluss und der höchste Wasserstand zusammen mit dem Hochwasserdurchfluss zu berücksichtigen.

Mit dem Einsatz einer solchen Steuerung steht für einen längeren Zeitraum im Jahr eine größere Fallhöhe zur energetischen Nutzung zur Verfügung (**Bild 3**). Ferner steigt die Fallhöhe für mittlere bis hohe Turbinendurchflüsse, wodurch die Leistung im oberen Bereich des Betriebsregimes gesteigert wird, welcher Effekt sich in den Wert der elektrischen Jahresarbeit durchprägt.

Setzt man den Betrachtungsmaßstab etwas größer an, bewirkt die Einführung einer dynamischen Stauzielregelung die Ausweitung des wirtschaftlich nutzbaren Potenzials an Fließgewässern und eine Stärkung der Rolle der Wasserkraft im Sektor der erneuerbaren Energien. Unter Berücksichtigung einer derartigen Steuerung würde das technisch nutzbare Potenzial der Wasserkraft in Deutschland, welches nach [5] aktuell bei ca. 33,2 TWh/a bis 42,1 TWh/a liegt, neu bewertet werden müssen.

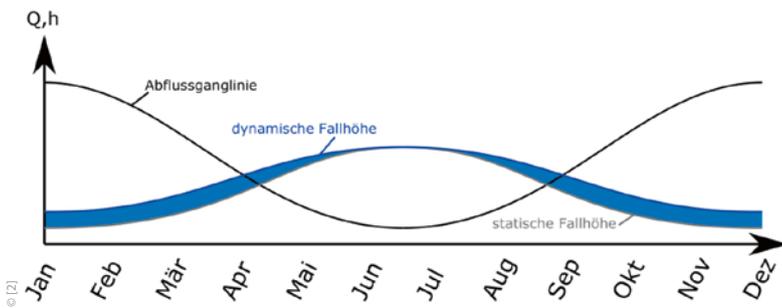
Neben energiewirtschaftlichen Vorteilen betreffen die Auswirkungen eines zeitweisen, zusätzlichen Aufstaus weitere Interessen. Aus diesem Grund ist vorab die Beeinträchtigung dieser zu untersuchen und zu bewerten.

In eine derartige Bewertung ist mit einzubeziehen, dass der zusätzliche Aufstau keine größere Wassertiefe bedeutet, sondern vielmehr eine Veränderung in der Dauer und Häufigkeit eines bestimmten höheren Stauziels im Betriebsregime der Anlage. Hierbei sind Abstimmungen insbesondere mit folgenden Interessensgruppen vorzusehen:

- Hochwasserschutz,
- Land- und Forstwirtschaft,
- Siedlungsentwicklung,
- Natur- und Umweltschutz.

### 3 Praktische Umsetzung

Im Rahmen der Vorplanung eines Kraftwerkneubaus mit der Zusammenlegung zweier Standorte an der unteren Nahe, einem linksseitigen Zufluss in den Rhein in Rheinland-Pfalz, Deutschland, wurde neben der Planung einer Fischaufstiegs-



**Bild 3:** Prinzipielle Wirkungsweise der dynamischen Stauzielregelung

sowie Fischschutz- und Fischabstiegsanlage auch die Durchführbarkeit einer dynamischen Stauzielregelung untersucht. Dazu ist vorgesehen, das unterstromige Staubaufwerk (Wehr 2) mit einer steuerbaren Klappe auszurüsten. Zunächst wurden unter Verwendung einer 2-D-HN-Simulation die Ausdehnung der gestauten Fließstrecke sowie die Wasserspiegellagen für das Plangebiet im Ist-Zustand ermittelt. Dafür wurde der Abfluss der unteren Betriebsgrenze des Turbinensatzes als hydraulische Randbedingung angesetzt. Anschließend wurde das Stauziel am Querbauwerk so angepasst, dass die Ausdehnung der Staustrecke bis zum Abfluss der oberen Betriebsgrenze der Ausdehnung des Ist-Zustands entspricht. Anhand dieser Erkenntnisse wurde die Steuerung des beweglichen Wehres im dynamischen Stau entworfen und über eine Planungsvariante nachgewiesen. Die durch die Steuerung hervorgerufenen Höhendifferenzen in den Wasserspiegellagen sind in **Bild 4** dargestellt.

Durch die Ertüchtigung des bestehenden festen Wehres am Standort 2 mit einer beweglichen Klappe als Regelorgan und der Einführung einer dynamischen Stauzielregelung kann bei Wegfall des bisherigen Wehres am Standort 1 bei dem genannten Vorhaben ein Teil der Fallhöhe für größere Durchflüsse erhöht werden. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass für den Abfluss der oberen Betriebsgrenze eine rechnerisch um 27,8 % erhöhte Fallhöhe bei der Energieerzeugung genutzt werden kann. Daraus ergibt sich, dass die Anlagenleistung bei dem korrespondierenden Durchfluss steigt.

Weil dieser Durchfluss jedoch seltener im Jahr auftritt, kann sich eine abflussbezogene punktuelle Steigerung der elektrischen Leistung von bis zu einem Viertel (je nach Abfluss) nicht vollständig in der Betrachtung der Jahresarbeit wiederfinden. Wie in **Bild 5** dargestellt, steigt die Jahresarbeit entsprechend der zugrundeliegenden Abflussdauerlinie. An dieser

Stelle werden die Dauerlinien mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten 95 %, 50 % und 5 % untersucht. Deutlich ist zu sehen, dass die Steigerung infolge der dynamischen Stauzielregelung bei den Abflussereignissen mit einer geringen Überschreitungswahrscheinlichkeit - und dementsprechend den höheren Abflüssen - mit zu erwartenden Werten umfangreicher ausfällt als bei Abflussereignissen mit einer höheren Überschreitungswahrscheinlichkeit.

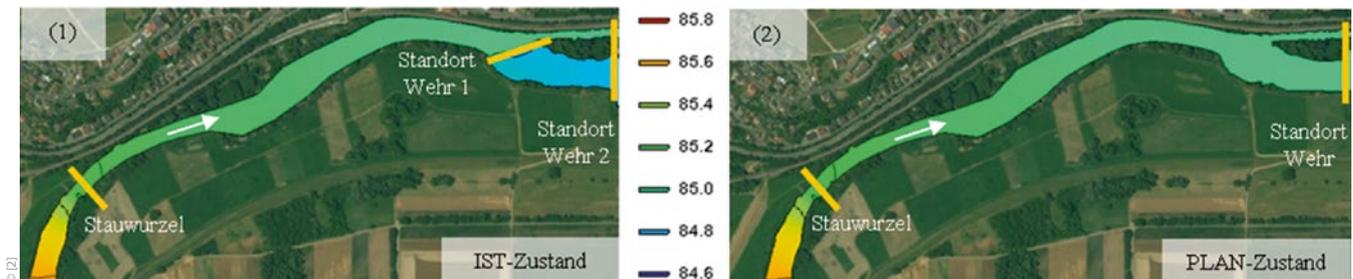
In der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die zu erwartende Steigerung der Jahresarbeit mit bis zu 10 % für die Varianten höher ausfällt,

welchen die weniger wahrscheinlichen Dauerlinien zugrunde legen. Für eine sehr wahrscheinliche, d. h. konservative Annahme der Dauerlinie liegt die Arbeitssteigerung bei ca. 7 %.

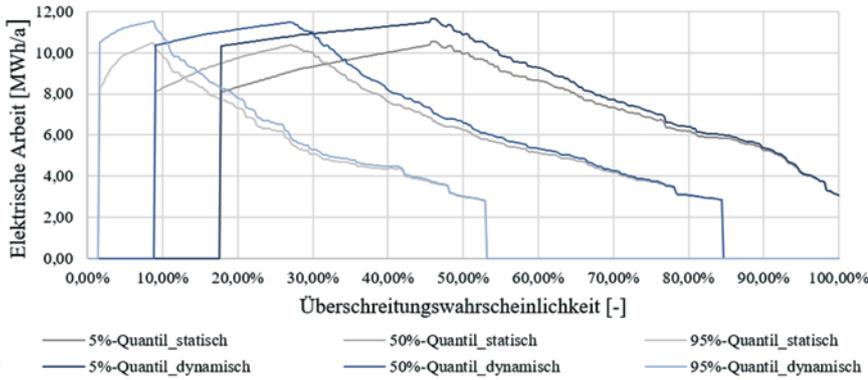
#### 4 Fazit

Die dynamische Stauzielregelung ermöglicht es, das Stauziel einer Wasserkraftanlage für das Betriebsregime ohne zusätzliche Ausdehnung der Staustrecke anzuheben und somit die Fallhöhe temporär zu steigern. Dies führt bei den korrespondierenden Durchflüssen zu einer erhöhten elektrischen Leistung der Anlage und in Kombination mit der standortspezifischen Abflussdauerlinie gleichermaßen zu einer Steigerung der elektrischen Jahresarbeit. Dabei werden keine neuen Bereiche des Fließgewässers eingestaut, sondern lediglich die Häufigkeit und Dauer des Einstaus von ohnehin staubeeinflussten Gewässerabschnitten energiewirtschaftlich positiv beeinflusst. Für die Anlage des hier aufgeführten Beispiels kann eine Steigerung der elektrischen Jahresarbeit in einer Größenordnung von 7 bis 10 % nachgewiesen werden. Aktuelle Untersuchungen zur Anpassung der Turbinenauslegung deuten jedoch auf mögliche größere Steigerungen hin.

Wird die dynamische Stauzielregelung unter wirtschaftlichen Aspekten betrachtet, ist für das Beispiel absehbar, dass sich ihre Implementierung nach ca. zwei Dritteln der technischen Bauteillebensdauer amortisiert. Im Allgemeinen ist eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit insbesondere dann möglich, wenn ihre bauliche Umsetzung mit weiteren Bauarbeiten (wie beispielsweise Sanierungsarbeiten oder die Errichtung von Fischaufstiegsanlagen) kombiniert wird. Es ist anzumerken, dass durch die Errichtung einer beweglichen Klappe das Höheniveau der festen Staukörperoberkante vertikal nach unten verschoben werden kann. Dadurch kann neben den energiewirt-



**Bild 4:** Wasserspiegellagen bei Mittelwasser im (1) Ist- und (2) Plan-Zustand in [m ü. NN]



**Bild 5:** Vergleich der Jahresarbeit von einer statischen und einer dynamischen Steuerung mit Eintrittswahrscheinlichkeit

schaftlichen Vorteilen gleichermaßen die Möglichkeit entstehen, im Hochwasserfall durch das Freigeben von zusätzlichem Fließquerschnitt die Wasserspiegellage im Oberwasser zu senken.

**Autor**

**Dipl.-Ing. Niklas Schwiersch (geb. Drews)**

Technische Universität Dresden  
 Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik  
 August-Bebel-Straße 30  
 01219 Dresden  
 Niklas.Schwiersch@tu-dresden.de

**Literatur**

- [1] Heimerl, S.; Drews, N.; Kohler, B.: Dynamische Stauzielregelung als umweltverträgliche Wasserkraftoptimierung. In: Zenz, G. (Hrsg.): Wasserbausymposium: Wasserwirtschaft - Innovation aus Tradition. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2018, S. 115-122.
- [2] Drews, N.: Untersuchung von dynamischer Stauzielregelung hinsichtlich der Stauwurzelentwicklung. Dresden, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik. Diplomarbeit. 2017.
- [3] Giesecke, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E.: Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. 6. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [4] Heimerl, S.; Drews, N.; Kohler, B.: Dynamische Stauzielregelung als umweltverträgliche Wasserkraftoptimierung. In: Nürnberger Wasserbausymposium 2017, Nürnberg, 14.12.2017, S. 71-76.
- [5] Anderer, P.; Bauer, N.; Dumont, U.; Heimerl, S.; Ruprecht, A.; Wolf-Schumann, U.: Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen (2011), Heft 45, S. 19-28.

**Hinweis**

Dieser Beitrag entstand im Zusammenhang mit dem „Studienpreis Wasser- und Talsperrenbau“, der gemeinsam durch das Deutsche Talsperrenkomitee e. V. (DTK) und die Fachzeitschrift WasserWirtschaft ausgelobt und anlässlich des 18. Deutschen Talsperrensymposiums 2019 in Leipzig verliehen wurde. Der Autor wurde für seine hier wieder-gegebene Diplomarbeit mit dem 1. Preis gewürdigt.

**WASSERWIRTSCHAFT**



Niklas Schwiersch

**Investigation of the dynamic water level control with regard to backwater effects**

In times of the energy transition and the intensified expansion of renewable energy systems, this article presents an optimization approach for run-of-river power - the dynamic water level management. Its basic idea is to use river sections influenced by backwater more evenly via the operating regime of a hydropower plant. In contrast to conventional dam water level management, the head of the reservoir is not shifted towards the weir while the discharge rate increases, but is kept in position by temporarily raising the water level. This generates a greater head for the higher discharge rates of an operating regime. As can be shown in an example, this has a direct effect on the performance and, in interaction with the discharge duration line, on the annual work of the plant. The dynamic water level management thus represents an environmentally compatible, energy-efficient optimization for run-of-river power plants.

ANZEIGE

**SEBA HYDROMETRIE**

**Durchflussmessung 4.0 SEBA-Discharge-Keeper**

- kamerabasiert • berührungslos
- einfache Montage • wartungsfrei